

8. Федоров С. С. Анализ эффективности применения высокотемпературных секционных утилизаторов теплоты с кипящим слоем. Результаты исследований. Часть II // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 4. – С. 107–109.
9. Бородуля В. А. Высокотемпературные процессы в электротермическом кипящем слое. – Минск: Наука и техника, 1973. – 173 с.
10. Кожан А. П., Махорин К. Е., Гориславец С. П. Электросопротивление кипящего слоя графитовых частиц // ИФЖ, Том 15, №4. – 1968), С. 648–652.
11. Малиновский А. И., Рабинович О. С., Бородуля В. А., Гребеньков А. Ж., Сидорович А. М. Тепло- и массоперенос в дисперсных средах // ИФЖ. 2012. Т. 85. № 2. С. 239–245.
12. Тодес О. М., Цитович О. Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы. – Л.: Химия, 1981. – 296 с.
13. Prabir Basu. Combustion and Gasification in Fluidized Beds. – Boca Raton: CRC / Taylor & Francis, 2006. – 470 p.
14. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 1962. – 456 с.
15. Дульнев Г. Н., Новиков В. В. Процессы переноса в неоднородных средах. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 248 с.

УДК 669.042

С. В. Филатов *, С. А. Загайнов **, В. В. Филиппов *, О. Н. Собянина ****

* ОАО «НЛМК», г. Липецк, Россия,

** ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия,

*** ОАО «ЕВРАЗ НТМК», г. Нижний Тагил, Россия

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ, ВЫПЛАВЛЯЮЩИХ ЧУГУН ИЗ ВАНАДИЙСОДЕРЖАЩИХ ТИТАНОМАГНЕТИТОВ ЗА СЧЕТ ОБОГАЩЕНИЯ ДУТЬЯ КИСЛОРОДОМ

Аннотация

Показана теоретически и подтверждается промышленными данными принципиальная возможность повышения интенсивности работы доменных печей, выплавляющих чугун из ванадийсодержащих титаномагнетитов за счет повышения содержания кислорода в дутье.

Константа равновесия, титан, карбид титана, обогащение дутья кислородом, производительность, удельный расход кокса.

Abstract

Reserves of blast furnace efficiency increase are revealed on the basis of calculations and industrial experiments. Technical and economical performance of a blast furnace production of pig iron from vanadium-containing titanomagnetites can be improved by increase of oxygen content in a blow.

Equilibrium constant, titanium, titanium carbide, oxygen enrichment, production performance, specific coke consumption.

Как известно [1; 2], образование карбида титана является одним из основных факторов, снижающих эффективность доменной плавки ванадийсодержащих титаномagnetитов. В качестве основного показателя, определяющего процессы карбидообразования, обычно рассматривается теоретическая температура горения.

Термодинамический анализ условий восстановления оксидов титана в доменной печи [3–5] показал, что наиболее вероятными реакциями восстановления являются: $\text{TiO}_2 + \text{C} = \text{TiO} + \text{CO}$ и $\text{TiO} + \text{C} = \text{TiC} + \text{CO}$.

Уравнения для расчета равновесной концентрации продуктов реакций имеют следующий вид:

$$[\text{TiO}] = \frac{K_p a_{\text{TiO}_2}}{\text{CO} \cdot P_{\text{общ}}} 100, \quad (1)$$

$$[\text{TiC}] = \frac{K_p a_{\text{TiO}}}{\text{CO} \cdot P_{\text{общ}}} 100. \quad (2)$$

где a_{TiO} , a_{TiO_2} – активность TiO и TiO_2 в шлаке.

Для выполнения анализа влияния кислорода в дутье и температуры шлака использовался натурно – модельный подход. В рамках этого подхода, путем линеаризации уравнения константы равновесия получено следующее соотношение.

$$\frac{\Delta[\text{TiC}]}{[\text{TiC}]} = \frac{\Delta K_p}{K_p} + \frac{\Delta a_{\text{TiO}}}{a_{\text{TiO}}} - \frac{\Delta \text{CO}}{\text{CO}} - \frac{\Delta P_{\text{общ}}}{P_{\text{общ}}} \quad (3)$$

Данное соотношение позволяет оценить влияние давления, концентрации CO в газе, температуры и содержания оксидов титана на равновесную концентрацию карбида титана.

С использованием зависимостей, приведенных в работах [3–5], выполнен расчет среднесуточных значений содержания титана в чугуна для условий работы доменной печи ОАО «ЕВРАЗ НТМК». Результаты расчета в сопоставлении с фактическим содержанием титана приведены на рис. 1.

Максимальная погрешность расчета содержания титана в чугуна не превышает 0,02 %.

Из уравнения (3) получена зависимость допустимого изменения температуры шлака при изменении содержания кислорода в дутье.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta \text{CO}}{\text{CO} \cdot (0,03958 - 0,000022t)}. \quad (4)$$

Приведенное уравнение показывает, что повышение содержания кислорода в дутье допускает повышение температуры шлака, так как приводит к изменению содержания CO в горновых газах.



Рис. 1. Сопоставление расчетного и фактического изменения содержания титана в чугуна

Расчет равновесной концентрации титана и сопоставление ее с фактической показал, что восстановление оксидов титана определяется кинетикой процесса, а именно временем пребывания расплава в области повышенных температур. Данное заключение подтверждают производственные данные о влиянии производительности доменной печи №6 ОАО «НТМК» на соотношение содержания оксида титана в шлаке к содержанию титана в чугуна (рис. 2).

Время пребывания расплава в области высоких температур выше горизонта уровня фурм может быть связано с изменением размера кусков кокса вязкости шлака и интенсивности плавки.

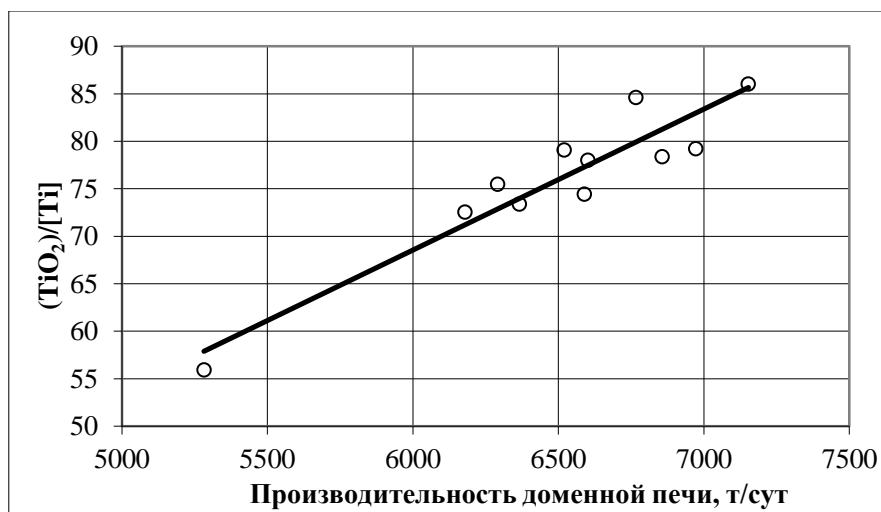


Рис. 2. Влияние производительности доменной печи на восстановление титана при содержании кремния в чугуна меньше 0,09 %

Вопрос о возможности повышения производительности доменных печей за счет увеличения содержания кислорода в дутье рассмотрен в работе [2]. На основе анализа производственных данных сделан вывод, что повышение содержания кислорода в дутье не может сопровождаться повышением температуры фурменных газов. Вместе с тем, известное в теории теплообмена уравнение $W_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot \Delta t_{\Gamma} = W_{\text{ш}} \cdot c_{\text{ш}} \cdot \Delta t_{\text{ш}}$ показывает, что материал до одинаковой температуры может быть нагрет малым количеством газов с высокой температурой или большим количеством газов с малой температурой. Поэтому вопрос о возможности использования кислорода для повышения производительности доменной печи рассматривался в рамках закономерностей теплообмена в слое.

Дифференциальное уравнение, описывающее изменение температуры шихты ($t_{\text{ш}}$) по высоте печи, имеет следующий вид:

$$\frac{dt}{dh} = \frac{\alpha}{w_{\text{ш}} \cdot c_{\text{каж}}} \cdot (t_{\Gamma} - t_{\text{ш}}), \quad (5)$$

где α – коэффициент теплопередачи, Вт/м³К;

$w_{\text{ш}}$ – скорость движения шихты, м/с;

$c_{\text{каж}}$ – кажущаяся теплоемкость шихты, Дж/м³К;

t_{Γ} – температура газа на входе в слой.

Данное уравнение использовалось для анализа условий прогрева шихты находящейся непосредственно в зоне над фурменным очагом. При этом температура шихты должна оставаться постоянной. Принято, что t_{Γ} равна теоретической температуре горения. Расчеты выполнялись для условий постоянного количества газов, что позволяет принять неизменным коэффициент теплопередачи.

Условия, при которых увеличение теоретической температуры горения при сохранении температуры шихты на выходе из слоя, обеспечиваются постоянством $\frac{dt}{dh}$. Кажущаяся теплоемкость шихты зависит от количества восстановленных примесей, удельного выхода шлака и удельного расхода кокса. Расчеты показали, что при изменении удельного расхода кокса на 10 кг на тонну чугуна $c_{\text{каж}}$ изменится не более чем на 1,2 %. Доминирующими факторами при анализе теплообмена можно считать скорость движения шихты и теоретическую температуру фурменных газов. В этом случае сохранение $\frac{dt}{dh}$ на прежнем уровне достигается при выполнении следующего условия:

$$\frac{\Delta t_{\Gamma}}{t_{\Gamma} - t_{\text{ш}}} = \frac{\Delta w_{\text{ш}}}{w_{\text{ш}}}.$$

Принято, что $\frac{\Delta w_{\text{ш}}}{w_{\text{ш}}}$ равно относительному изменению производительности печи.

Для оценки возможности увеличения производительности печи за счет повышения содержания кислорода в дутье выполнены расчеты при изменении содержания кислорода в дутье от 24,8 до 30,8 %. Расчеты выполнялись по методике, разработанной в УрФУ [6; 7]. Данная методика с достаточной для решения практических задач точностью позволяет учесть влияние расхода природного газа, содержания кислорода в дутье и расхода дутья на

производительность доменной печи, теоретическую температуру горения и удельный расход кокса.

Выполнено две серии расчетов. В первой серии расчетов минутный расход природного газа оставался постоянным, а во второй серии расход природного газа на тонну чугуна изменялся исходя из условия $\frac{dt}{dh} = const$.

Результаты расчетов показали, что увеличение производительности доменной печи за счет повышения содержания кислорода в дутье на 1 % допустимо при повышении теоретической температуры горения на 8 градусов. Из уравнения $\frac{\Delta t_{\Gamma}}{\Delta t_{III}} = \frac{W_{III}}{W_{\Gamma}}$ получено, что повышение температуры шлака на каждый градус достигается при повышении температуры газов на 2,3 °С. На основании выполненных расчетов сделан вывод, что повышение содержания кислорода в дутье на каждый процент может сопровождаться повышением теоретической температуры горения на 17–20 °С.

Среднегодовые данные, характеризующие эффективность обогащения дутья кислородом

Показатели работы ДП №6	2006	2007	2008*	2009	2010	2011
Производительность, т/сутки	4716	4831	4708	5738	5812	6577
Расход кокса, кг/т	413	418,2	418,1	415,6	412,3	404,2
Расход природного газа, м ³ /т	122,2	115	101	115,5	125,8	131,3
Содержание O ₂ в дутье, %	24,75	23,99	23,36	26,29	28,2	29
Теоретическая температура фурменных газов, °С	1828	1846	1887	1896	1889	1867
Изменение содержания кислорода в дутье, %		–0,76	–1,39	1,54	3,45	4,25
Изменение теоретической температуры фурменных газов, °С		18	59	68	61	39
Относительное изменение теоретической температуры фурменных газов, $\frac{^{\circ}\text{C}}{\%O_2}$		–23	–42	44	17	9
Относительное изменение производительности, $\frac{\%}{\%O_2}$		2,44	–0,17	21,67	23,24	39,46
Относительное изменение удельного расхода кокса, $\frac{\text{кг}}{\text{т чугуна}} / \%O_2$		–6,84	–3,67	1,69	–0,20	–2,07

** 9 месяцев 2008 года

На основе полученных теоретически данных в 2009 г. была разработана программа повышения производительности доменных печей за счет увеличения содержания кислорода в дутье. Резервы на увеличение расхода кислорода появились после остановки доменных пе-

чей малого объема из-за экономического кризиса 2008 года. К 2011 году содержание кислорода в дутье превысило 29 %. В отдельные периоды содержание кислорода в дутье достигает 33 %.

Среднегодовые данные, характеризующие эффективность обогащения дутья кислородом, за 6 лет приводятся в таблице. При расчете относительных изменений показателей работы доменных печей за базу принимались показатели 2006 года.

Обобщенные данные подтвердили наличие ограничений на увеличение содержания кислорода в дутье. Повышение содержания кислорода в дутье при увеличении теоретической температуры на 44 °С на 1 % кислорода (доменная печь № 6, 2009 год) сопровождалось повышением производительности печи при увеличении удельного расхода кокса. В тех случаях, когда повышение содержания кислорода в дутье не превышает 25 °С на каждый процент кислорода, наблюдается увеличение производства и снижение удельного расхода кокса.

Полученные в результате выполненного анализа данные создают научную основу для дальнейшего повышения производительности печей за счет обогащения дутья кислородом. Кроме того, наличие взаимосвязи между допустимым изменением скорости схода шихты и теоретической температурой горения позволит избежать ошибок при внедрении технологии выплавки чугуна с вдуванием пылеугольного топлива.

Список использованных источников

1. Смирнов Л. А., Дерябин Ю. А., Шаврин С. В. Металлургическая переработка ванадийсодержащих титаномагнетитов // *Металлургия*. Челябинск, 1990. 255 с.
2. Освоение доменной плавки титаномагнетитовых руд с обогащением дутья кислородом / Волков В. В. [и др.] «Металлургическая переработка комплексных железных руд»: . темат.отрасл.сб., Свердловск, 1986. С. 7–13.
3. Собянина О. Н., Загайнов С. А., Филиппов В. В. Анализ доменной плавки при производстве ванадиевого чугуна // *Международная научно-практическая конференция «Повышение качества образования и научных исследований»*. В рамках VII Сатпаевских чтений (10-12 апреля 2008 г.), 2008. С. 124–128.
4. Реализация мероприятий по снижению содержания титана в чугуне / С. А. Загайнов, А. В. Кушнарев, С. В. Шаврин, В. В. Филиппов, Собянина О. Н. // *Материалы 3-й международной конференции «Трансмет-2007»*. ОАО "Нижнетагильский металлургический комбинат", 2008. С. 169–172.
5. Пат. №2159288 Способ доменной плавки титаносодержащего железорудного сырья. 2000. Бюл. №32.
6. Пат. РФ на полезную модель № 69068. Комплекс для выплавки чугуна из титаносодержащих агломерата и окатышей разной основности. 2007. Бюл. №34.
7. Информационные системы в металлургии / Н. А. Спирин, Ю. В. Ипатов, В. И. Лобанов, В. А. Краснобаев, В. В. Лавров, В. Ю. Рыболовлев, В. С. Швыдкий, С. А. Загайнов, О. П. Онорин / под ред. Н. А. Спирина. Екатеринбург: УГТУ, 2001. 617 с.
8. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин [и др.]; под редакцией Н.А. Спирина. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. 301 с.